

Desain *Maximum Power Point Tracking* untuk Turbin Angin Menggunakan *Modified Perturb & Observe* (P&O) Berdasarkan Prediksi Kecepatan Angin

Dwiyan Anugrah Ernadi, Margo Pujiantara, Mauridhi Hery Purnomo

Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)

Jl. Raya Kampus ITS Sukolilo, Surabaya 60111

E-mail: dwiyan12@mhs.ee.its.ac.id, margo@ee.its.ac.id, hery@gmail.com

Abstrak— Perkembangan teknologi energi baru dan terbarukan menjadi persoalan yang mendunia saat ini. Berbagai cara seperti kecerdasan buatan, algoritma peramalan dan optimasi kontrol dilakukan untuk mendapatkan hasil yang stabil dan dapat diaplikasikan pada masa yang akan datang. Pada buku Tugas akhir ini akan dibahas mengenai implementasi *Maximum Power Point Tracking* (MPPT) pada sistem turbin angin skala kecil yang dikontrol menggunakan metode *Modified Perturb & Observe* (P&O) pada kontrol konverter buck berdasarkan nilai arus dan tegangan yang dihasilkan pada keluaran *Permanent Magnet Synchronous Generator* (PMSG). P&O merupakan metode yang paling banyak digunakan pada MPPT. Dengan modifikasi pada hal mendasar dari algoritma P&O, MPPT dapat menghasilkan daya optimal dan kecepatan yang lebih baik dalam pencarian nilai daya maksimum. Modifikasi pada metode P&O dapat dilakukan dengan cara menambahkan strategi kontrol dalam perubahan besarnya step dari *duty cyle* (ΔD). Seiring dengan perubahan besarnya tegangan dan arus masukan pada MPPT, keluaran daya yang dihasilkan juga akan berubah-ubah. Perubahan daya tersebut akan mempengaruhi perubahan ΔD . Dengan modifikasi metode P&O pada MPPT ini, osilasi daya keluaran pada turbin angin dapat diredam dengan baik. Hasil akhir dari penelitian ini adalah turbin angin skala kecil menggunakan sistem MPPT berdasarkan metode *Modified P&O* dapat menghasilkan daya maksimum yang optimal dengan kecepatan tracking yang cepat.

Kata Kunci— Energi Baru dan Terbarukan, Turbin Angin, PMSG, MPPT, *Modified Perturb and Observe*.

I. PENDAHULUAN

ENERGI angin merupakan energi yang biasa digunakan sebagai sumber pembangkitan tenaga listrik dan bagian penting dalam kebutuhan energi dunia. Sebagai energi penting di dunia, energi angin mengalami perkembangan teknologi yang sangat cepat. Teknologi pembangkitan tenaga angin dikembangkan untuk dapat terhubung ke dalam sistem kelistrikan. Kapasitas energi angin yang tersedia dan dapat diubah menjadi tenaga listrik sebesar 1.26x10⁹ MW. Kapasitas

tersebut lebih besar 20 kali lipat dibandingkan dengan konsumsi energi dunia saat ini.

Potensi energi angin di Indonesia banyak ditemui pada pesisir selatan Jawa, Sumatera, dan pulau-pulau di Indonesia bagian timur. Berdasarkan data Blueprint Energi Nasional, Departemen ESDM RI, dapat dilihat bahwa potensi Pembangkit Listrik Tenaga Angin di Indonesia sangat menarik untuk dikembangkan karena dari potensi sebesar 9.29 GW, baru sekitar 0.5 GW yang dikembangkan, yang berarti baru sekitar 5.38% [1]. Daerah Indonesia bagian timur seperti NTB, NTT, dan Maluku memiliki energi angin yang potensial untuk dimanfaatkan. Hal ini berbanding terbalik dengan ketersediaan kebutuhan listrik pada daerah tersebut yang sangat minim.

Energi angin dapat menghasilkan energi listrik dengan menggunakan turbin angin. Turbin angin memiliki berbagai macam jenis berdasarkan dari bentuk dan poros yang digunakan. Turbin angin terhubung dengan generator yang dapat mengubah energi gerak dari turbin angin menjadi energi listrik. Generator yang umum digunakan pada pembangkitan energi listrik berbasis turbin angin adalah *Permanent Magnet Synchronous Generator* (PMSG).

Besar daya keluaran yang dihasilkan oleh PMSG bervariasi, tergantung dari besarnya kecepatan angin. *Maximum Power Point Tracking* (MPPT) digunakan untuk mendapatkan nilai daya maksimum dari pembangkitan energi listrik ini. MPPT berbasis metode *Perturb & Observe* (P&O) telah banyak digunakan dalam pencarian nilai daya maksimum. P&O merupakan metode yang mudah untuk diimplementasikan pada sistem turbin angin karena memiliki algoritma yang sederhana. Selain itu, penggunaan metode P&O tidak membutuhkan informasi kecepatan angin dan parameter turbin angin sehingga lebih efisien dan memiliki harga yang paling rendah diantara metode-metode yang ada. Metode ini memiliki *feedback* yang sederhana dan beberapa parameter pengukuran. Kekurangan metode ini menghasilkan osilasi pada kondisi steady state karena perubahan *duty cycle* konstan.

Modifikasi dengan mengombinasikan metode P&O dengan metode prediktif. Kedua metode tersebut bekerja secara bergantian sesuai dengan kondisi dari arus dan tegangan pada sisi masukan konverter. Metode prediktif digunakan untuk menentukan besarnya perubahan *step* pada metode P&O. Apabila perubahan dari tegangan sangat besar, maka akan

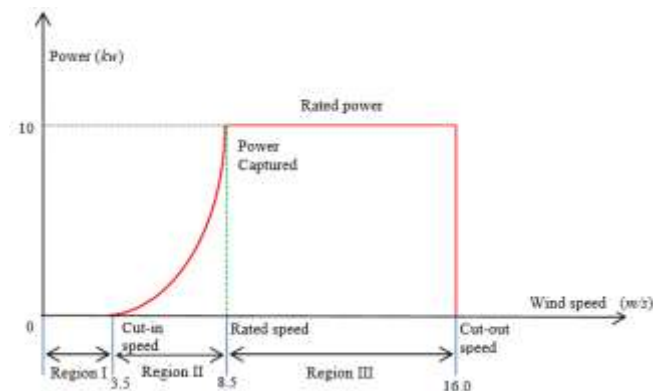
digunakan *step size* yang bernilai besar, sedangkan apabila perubahan dari nilai tegangan kecil digunakan *step size* yang kecil [2].

Dengan modifikasi pada hal mendasar dari algoritma P&O, MPPT dapat menghasilkan akurasi yang lebih baik dalam pencarian nilai daya maksimum. Modifikasi pada metode P&O dapat dilakukan dengan cara menambahkan strategi kontrol dalam perubahan besarnya *size-step* dari *duty cycle* (ΔD). Pada tugas akhir ini algoritma *modified perturb & observe* akan diimplementasikan pada sistem turbin angin *standalone* dengan menggunakan mikrokontroler.

II. DASAR TEORI

A. Turbin Angin

Turbin angin mengikuti variasi perubahan kecepatan angin dan menghasilkan daya maksimum pada saat keadaan operasi normal dengan kecepatan rendah melalui MPPT. Saat kecepatan angin lebih besar dari *rating* kecepatan turbin angin, turbin angin akan bekerja dalam keadaan daya konstan dengan cara mengatur beban generator atau *pitch angle* turbin [3]. Gambar 1 menunjukkan kurva daya ideal pada turbin angin dengan kecepatan angin yang bervariasi. Pada Region II, daya keluaran turbin akan bekerja sesuai dengan MPPT.



Gambar 1. Kurva daya ideal pada turbin angin

Turbin angin merupakan alat konversi energi angin menjadi energi mekanik. Energi angin (P_{wind}) merupakan hasil dari setengah kali massa jenis udara (ρ) dengan luas penampang cakupan dari turbin angin (A) dan pangkat tiga dari kecepatan anginy (v^3). Energi tersebut menggerakkan rotor turbin angin yang terhubung dengan generator untuk menghasilkan listrik. Daya keluaran maksimum dari turbin angin terbatas pada koefisien daya (C_p). Koefisien daya adalah fungsi dari *tip speed ratio* λ . Nilai dari koefisien daya tidak lebih dari 59.3%. Umumnya, C_p bernilai 25% hingga 45% [12]. Daya mekanik (P_m) yang dihasilkan oleh angin dari rotor turbin angin dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$P_m = \frac{1}{2} \rho C_p \pi R^2 v^3 \quad (1)$$

R = jari-jari turbin angin (m)

ρ = massa jenis udara (kg/m^3)

v = kecepatan angin (m/s)

Sedangkan torsi T (Nm) yang dihasilkan oleh turbin angin adalah

$$T = \frac{P_m}{\omega} \quad (2)$$

ω = kecepatan putar rotor turbin angin (rad/s)

Dalam tugas akhir ini, karena turbin angin yang digunakan memiliki sudut turbin yang statis (*fixed pitch*), maka nilai dari *pitch angle* β sama dengan nol untuk mendapatkan nilai C_p maksimal. Setelah semua nilai persamaan dimasukkan maka akan didapatkan kurva karakteristik dari daya atau torsi mekanik dengan kecepatan pada rotor.

Setiap sistem pasti memiliki suatu tingkat efisiensi kerja karena hampir tidak ada sistem yang mampu bekerja sempurna, seperti halnya turbin angin ini. Oleh karena itu, untuk mendapatkan energi mekanik dari hasil turbin ini maka perlu diperhitungkan juga nilai efisiensi turbin (C_p). Nilai efisiensi ini sudah ditentukan dari awal mula sistem (turbin angin) ini didesain. Energi mekanik dari turbin ini berupa kecepatan putar rotor turbin (ω) dan torsi T , (besar gaya yang diberikan pada suatu panjang lengan beban/*blade*).

Prinsip kerja dari turbin angin ini dengan menangkap angin menggunakan sudu turbin yang di desain seperti sayap pesawat terbang. Ketika angin bertiup melalui sudu tersebut, maka akan timbul udara bertekanan rendah pada bagian bawah sudu, tekanan udara yang rendah akan menarik sudu untuk bergerak ke area tersebut. Gaya yang ditimbulkan dinamakan gaya angkat. Besarnya gaya angkat ini biasanya lebih kuat dari tekanan pada depan sisi sudu, atau yang biasa disebut gaya tarik. Kombinasi antara gaya angkat dan gaya tarik menyebabkan rotor berputar seperti propeller dan memutar generator. Turbin angin bisa digunakan secara *stand-alone*, atau bisa dihubungkan ke jaringan transmisi atau bisa dikombinasikan dengan sistem panel surya.

B. Permanent Magnet Synchronous Generator (PMSG)

Generator merupakan alat konversi energi mekanik menjadi energi listrik. Generator mengubah torsi (T) dan kecepatan putar rotor (ω) yang diterimanya dari *blade* menjadi nilai tegangan (V) dan arus (I). Hasil keluaran dari generator ini berupa listrik AC 3 fasa.

Energi mekanik

$$P_m = \omega \cdot T \quad (3)$$

Energi listrik

$$P_e = V \cdot I \quad (4)$$

V = tegangan (volt)

I = arus (*ampere*)

Generator sinkron dengan magnet permanen tidak membutuhkan sistem eksitasi karena sumber eksitasi disediakan oleh magnet permanen pada rotor. Kontrol tegangan untuk sistem eksitasi tidak diperlukan, sehingga mengurangi kesulitan dalam sistem kontrolnya.

Permanent Magnet Synchronous Generator (PMSG) biasanya digunakan untuk membangkitkan listrik pada daya rendah, sehingga penggunaan PMSG sesuai untuk pembangkitan listrik tenaga angin untuk skala kecil. Keuntungan menggunakan sebuah PMSG adalah biaya yang rendah, ketahanan, kesederhanaan, dan lebih mudah mengkopling grid, akan tetapi kelemahan utamanya adalah perlunya kompensator faktor daya dan efisiensi yang lebih rendah.

Prinsip generator sinkron terdapat hubungan antara frekuensi dan kecepatan yang ditunjukkan dalam persamaan berikut:

$$Ns = Nr = \frac{120f}{p} \quad (5)$$

Nr = kecepatan medan rotor (rpm)

N_s = kecepatan medan stator (rpm)

p = jumlah kutub

f = frekuensi (Hz)

C. Maximum Power Point Tracking (MPPT)

Maximum Power Point Tracking atau yang sering disebut dengan MPPT adalah metode pelacakan nilai daya maksimum dari suatu sistem. Pada suatu titik tertentu sistem tersebut memiliki nilai daya maksimum. Daya keluaran yang maksimal ini akan menghasilkan efisiensi yang tinggi. Prinsip kerja dari MPPT adalah dengan menaikkan dan menurunkan tegangan kerja. Hal tersebut dapat dilakukan dengan mengatur *duty cycle* pada konverter. Perubahan besar nilai daya tergantung dari perubahan nilai tegangan dan arus.

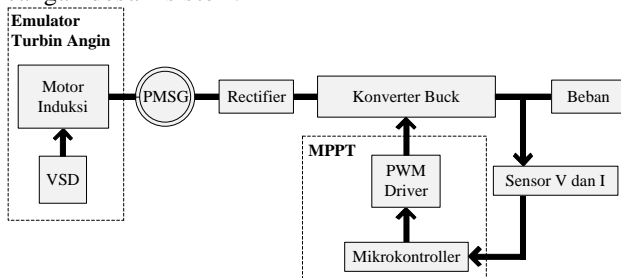
Pada turbin angin MPPT digunakan untuk mengoptimalkan keluaran daya maksimum dari generator. Setiap kecepatan angin memiliki daya maksimum yang berbeda-beda. Generator yang terhubung dengan turbin angin akan menghasilkan daya maksimum apabila metode yang digunakan pada MPPT dapat bekerja sesuai dengan karakteristik angin. Metode yang digunakan pada MPPT bervariasi sesuai dengan algoritma yang digunakan.

III. PERANCANGAN PENELITIAN

A. Desain Sistem

Perancangan desain sistem optimalisasi turbin angin menggunakan *maximum power point tracking* (MPPT) berupa *software* dan *hardware*. Untuk perancangan *software* digunakan PowerSIM sebagai bahan simulasi desain sistem yang akan dibuat dan Arduino sebagai mikrokontroler dari pembangkit sinyal *pulse width modulation* (PWM). *Hardware* yang digunakan berupa turbin angin, *permanent magnet synchronous generator* (PMSG), konverter buck, sensor arus dan tegangan.

Proses perancangan sistem turbin angin dengan MPPT menggunakan metode *modified perturb and observe* dilakukan dengan menggunakan turbin angin sebagai penggerak rotor pada PMSG, PMSG sebagai generator yang menghasilkan listrik, daya keluaran PMSG disalurkan dengan menggunakan rectifier 3 fasa *full-bridge*, rangkaian konverter buck digunakan untuk mengatur besar tegangan, konverter buck terkontrol oleh MPPT sehingga keluaran daya pada konverter menghasilkan daya maksimum. Gambar 2 menjelaskan mengenai skema rancangan desain sistem.



Gambar 2. Diagram sistem turbin angin dengan MPPT



Gambar 3. Perangkat sistem turbin angin

B. Sensor Tegangan

Pembacaan sinyal tegangan menggunakan sensor tegangan yang dipasang pada sisi keluaran rectifier atau masukan dari konverter buck. Untuk perancangan sensor tegangan pada tugas akhir ini adalah dengan menggunakan rangkaian pembagi tegangan (*voltage divider*).

Tegangan DC keluaran dari rectifier nilainya diturunkan dulu menggunakan pembagi tegangan agar dapat terbaca oleh *Analog to Digital Converter* (ADC) pada mikrokontroler sebagai hasil pengukuran, karena ADC hanya membaca tegangan pada rentang nilai 0-5 Volt. Sehingga keluaran dari sensor didesain sampai batas maksimal 5 V. Bila terjadi perubahan pada tegangan masukan, maka juga akan terjadi perubahan pada tegangan keluaran dari rangkaian pembagi tegangan.

Perhitungan untuk menurunkan tegangan menggunakan rumus pembagi tegangan sebagai berikut:

$$V_{out} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \times V_{in} \quad (6)$$

Besar nilai resistor yang digunakan pada pembagi tegangan adalah 10 K Ω dan 390 K Ω . Dari rangkaian dan perhitungan nilai tegangan pada persamaan 6, maka tegangan dari keluaran rectifier pada saat tegangan dalam kondisi maksimum adalah

$$V_{out} = \frac{10 \text{ K}}{10 \text{ K} + 390 \text{ K}} \times V_{in} \quad (7)$$

$$V_{out} = 0.025 V_{in} \quad (8)$$

C. Sensor Arus

Sensor arus yang digunakan untuk membaca nilai arus keluaran pada rectifier menggunakan ACS758LCB-050. Sensor tersebut dapat membaca nilai arus hingga 50 Ampere. Keluaran dari arus ini merupakan tegangan yang proporsional dengan nilai arus masukan yang dibaca, dengan sensitivitas 40 mV/A. Dengan menggunakan sensor arus, maka akan menyederhanakan pembacaan dari arus sekaligus dapat dijadikan acuan masukan dari mikrokontroler. Bagian *sensing* dan keluaran dari sensor ini terpisah, sehingga arus besar yang lewat sama sekali tidak membahayakan bagian keluaran yang tersambung dengan mikrokontroler yang bekerja dalam rentang arus kecil.

Pada sisi keluaran sensor terpasang pengaman berupa dua buah dioda yang berfungsi untuk memotong tegangan keluaran dari sensor. Hal ini dilakukan untuk mengurangi resiko

rusaknya mikrokontroler akibat dari besarnya nilai sisi masukan pada sensor.

D. Rectifier

Rectifier yang digunakan dalam tugas akhir ini adalah penyearah 6 pulsa tidak terkontrol. Dengan menggunakan tiga pasang dioda yang bekerja secara bergantian, maka tegangan AC akan diubah menjadi tegangan DC yang memiliki enam puncak gelombang. Penyearah 6 pulsa tidak terkontrol dipilih untuk mempermudah kontrol dari penyearah.

Dalam penggunaan rectifier pada sistem turbin angin ini juga digunakan kapasitor. Kapasitor digunakan untuk memperhalus tegangan keluaran rectifier. Kapasitor yang digunakan memiliki kapasitas 2200 μF .

E. Arduino MEGA 2560

Mikrokontroler yang digunakan adalah Arduino. Arduino digunakan untuk mempermudah dalam pemrograman yang akan dibuat. Dalam tugas akhir ini dipilih Arduino tipe MEGA 2560. Arduino MEGA 2560 digunakan karena memori yang dimiliki oleh Arduino MEGA 2560 lebih besar dibandingkan dengan Arduino lainnya.

Analog input yang digunakan adalah port A0 sebagai hasil pembacaan dari sensor tegangan dan port A4 sebagai hasil pembacaan dari sensor arus. Port PWM yang digunakan sebagai keluaran dari *duty cycle* adalah port 13. Port 13 digunakan karena pada port ini ada LED sebagai indikator, sehingga dapat diketahui apakah Arduino sudah bekerja mengeluarkan *duty cycle* atau belum. Frekuensi keluaran dari Arduino MEGA 2560 pada bagian port PWM adalah sebesar 490 Hz, kecuali port 4 dan 13 yang memiliki frekuensi 980 Hz. Desain dari perancangan konverter buck bekerja pada frekuensi 31.25 kHz, sehingga diperlukan perubahan besaran frekuensi dari Arduino. Hal ini dapat dilakukan dengan memasukkan *library* pada Arduino untuk mengubah frekuensi yang dikeluarkan.

Tabel 1
Parameter Arduino Mega 2560

Analog input tegangan	A0
Analog input arus	A4
Frekuensi kerja	31.25 kHz
PWM output	13

F. Konverter Buck

Besarnya nilai induktor dan kapasitor dapat ditentukan berdasarkan perhitungan. Konverter buck merupakan penurun tegangan DC ke DC dengan penyaklaran pada MOSFET. Penyaklaran MOSFET bekerja pada saat *gate* diberikan tegangan. Persamaan konversi tegangan dapat dilihat pada persamaan di bawah ini:

$$V_o = V_s D \quad (9)$$

Tegangan keluaran akan lebih rendah daripada tegangan masukan secara linear terhadap *duty cycle*. Semakin tinggi *duty cycle*, maka tegangan keluaran akan semakin besar mendekati nilai tegangan masukan. MPPT harus mencari nilai *duty cycle*, sehingga daya yang dihasilkan turbin angin berada pada nilai maksimal.

Dalam perancangan konverter buck mengacu pada hasil keluaran tegangan dari rectifier yang terhubung dengan *permanent magnet synchronous generator* dan turbin angin. Nilai masukan dari konverter buck memiliki variasi tegangan

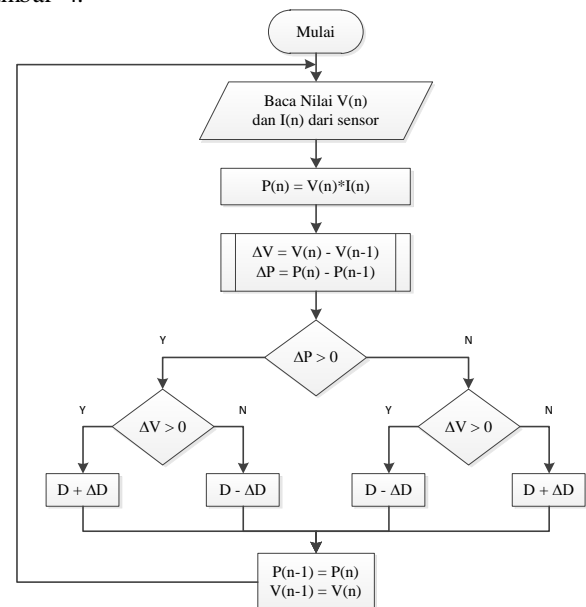
37 V hingga 100 V dan arus 0.3 A hingga 3 A. Spesifikasi dari konverter yang dirancang dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2

Spesifikasi Konverter Buck	
Parameter	Nilai
Induktor	10 mH
Kapasitor	300 μF
Frekuensi	31.5 kHz

G. Perturb and Observe

Metode perturb and observe (P&O) dapat digunakan untuk menentukan titik optimum. Dengan menggunakan metode P&O, nilai daya maksimum bisa didapatkan tanpa harus mengetahui karakteristik dari sistem turbin angin. Nilai daya maksimum didapatkan dengan cara mengatur besaran tegangan dc pada konverter. Dengan perubahan besar tegangan dc pada konverter, maka nilai daya juga akan berubah. Metode ini mengatur dan mengamati setiap perubahan tersebut. Perubahan ditentukan pada *step-size* (ΔD) tertentu dan waktu tertentu. Besar nilai daya listrik yang dihasilkan dibandingkan dengan daya listrik sebelumnya. Hal ini menentukan variabel ΔD berikutnya. Jika besar nilai daya yang dihasilkan meningkat maka variabel ΔD akan bernilai tetap, sebaliknya jika besar nilai daya yang dihasilkan menurun maka variabel ΔD akan berubah. Prinsip kerja dari metode ini dapat dilihat berdasarkan Gambar 4.



Gambar 4. Flowchart metode perturb and observe

Metode P&O merupakan metode yang paling sederhana dan mudah diaplikasikan diantara metode lainnya. Namun, metode ini memiliki keterbatasan. Tingkat efisiensi dari metode ini bergantung pada besaran variabel ΔD . Apabila nilai ΔD besar maka sistem akan cepat menuju pada nilai maksimum, tetapi akan menghasilkan fluktuasi yang besar saat sudah mencapai nilai maksimum yang mengakibatkan osilasi pada daya yang dihasilkan, sehingga efisiensinya rendah. Jika menggunakan ΔD yang kecil maka efisiensi sistem akan lebih baik, tetapi waktu yang dibutuhkan untuk menuju nilai maksimum sangatlah lambat yang mengakibatkan sistem tidak responsif.

Metode P&O merupakan metode yang paling sederhana dan mudah diaplikasikan diantara metode lainnya. Namun, metode ini memiliki keterbatasan. Tingkat efisiensi dari metode ini

bergantung pada besaran variabel ΔD . Apabila nilai ΔD besar maka sistem akan cepat menuju pada nilai maksimum, tetapi akan menghasilkan fluktuasi yang besar saat sudah mencapai nilai maksimum yang mengakibatkan osilasi pada daya yang dihasilkan, sehingga efisiensinya rendah. Jika menggunakan ΔD yang kecil maka efisiensi sistem akan lebih baik, tetapi waktu yang dibutuhkan untuk menuju nilai maksimum sangatlah lambat yang mengakibatkan sistem tidak responsif.

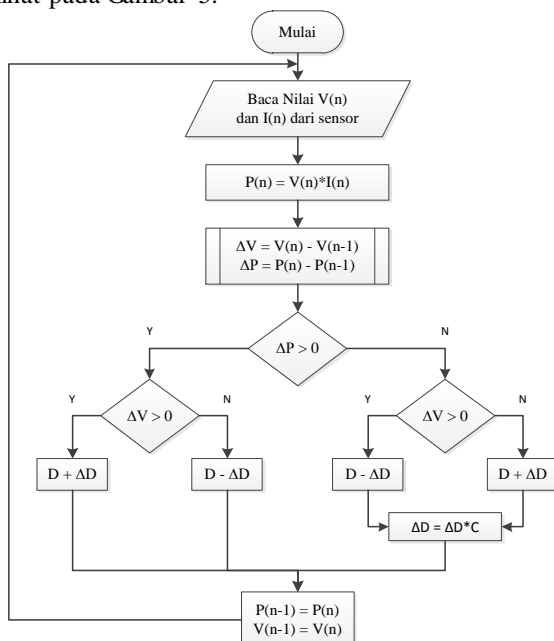
Algoritma *perturb and observe* memiliki beberapa parameter sebagai inisialisasi nilai awal dan besar perubahan nilai *step size* dari setiap iterasi yang dilakukan. Batasan *duty cycle* juga diperlukan dalam menjalankan algoritma ini dikarenakan untuk menjaga kemampuan dari konverter buck. Waktu tunda dalam menjalankan program dalam satu kali iterasi ditentukan untuk memberikan respon balik akibat perubahan dari nilai *duty cycle* yang diberikan. Tabel 3 menunjukkan parameter yang digunakan pada algoritma *perturb and observe*.

Tabel 3

Parameter Algoritma Perturb And Observe	
Batasan <i>duty cycle</i>	0.2-0.8
<i>Step size</i>	0.015
Delay	0.5-1 detik

H. Modified Perturb and Observe

Kekurangan pada metode *perturb and observe* (P&O) dapat diatasi dengan mengubah besaran nilai ΔD yang digunakan untuk mencari nilai titik maksimum daya yang dihasilkan. Ketika titik maksimum daya sudah didapatkan maka besaran ΔD akan dikalikan dengan konstanta dengan nilai antara 0-1, sehingga besaran ΔD akan semakin kecil. Dengan perubahan besaran nilai dari ΔD maka pada saat awal inisiasi nilai ΔD digunakan yang besar dan nantinya saat sudah mencapai titik nilai daya maksimum maka secara otomatis ΔD akan menjadi kecil. Prinsip kerja dari modified perturb and observe dapat dilihat pada Gambar 5.



Gambar 5. Flowchart metode modified perturb and observe
Modifikasi pada metode P&O ini diharapkan dapat memberikan waktu yang sangat responsif dan juga masalah osilasi pada sistem dapat dihilangkan karena fluktuasi dari nilai

daya saat mencapai nilai maksimum akan semakin berkurang karena perubahan dari nilai ΔD .

Algoritma *modified perturb and observe* juga memiliki beberapa parameter sebagai inisialisasi nilai awal dan besar perubahan nilai *step size* dari setiap iterasi yang dilakukan. Pada *modified perturb and observe* nilai *step size* akan berubah sesuai dengan respon dari sistem. Perubahan tersebut ditentukan oleh konstanta nilai C yang ditentukan. Batasan nilai *duty cycle* juga ditentukan untuk menjaga kemampuan dari konverter buck. Waktu tunda dalam menjalankan program dalam satu kali iterasi ditentukan untuk memberikan respon balik akibat perubahan dari nilai *duty cycle* yang diberikan. Tabel 4 menunjukkan parameter yang digunakan pada algoritma *modified perturb and observe*.

Tabel 4

Parameter Algoritma Modified Perturb And Observe	
Batasan <i>duty cycle</i>	0.2-0.8
<i>Step size</i>	0.015
Konstanta C	0.8
Delay	0.5-1 detik

IV. ANALISIS PENELITIAN

A. Pengujian Nilai Daya Maksimum

Pengujian nilai daya maksimum dilakukan dengan dua cara, yaitu menggunakan *maximum power point tracking* dan tanpa *maximum power point tracking*. Hasil dari kedua pengujian akan dibandingkan untuk mendapatkan keunggulan dan kekurangan dari penggunaan *maximum power point tracking*.

B. Pengujian Nilai Daya Maksimum Tanpa MPPT

Pengujian nilai daya maksimum tanpa MPPT dilakukan dengan cara menentukan kecepatan putaran dari pemodelan turbin angin yang terdapat pada motor induksi.

Pada pengujian ini kecepatan angin yang diambil adalah pada kecepatan angin 3 m/s hingga 5 m/s. Pada kecepatan tersebut *duty cycle* dari konverter buck diubah secara manual dari 0.2 hingga 0.8. Pada saat kecepatan 3 m/s hingga 5 m/s digunakan satu buah beban lampu.

Tabel 5
Hasil Daya Maksimum Pada Kecepatan 3 M/S

RPM = 224.9
Beban = 2 lampu

Duty Cycle (%)	Kecepatan (rpm)	V Rectifier (Volt)	I Rectifier (Ampere)	P Rectifier (Watt)	V Converter (Volt)	I Converter (Ampere)	P Converter (Watt)	P MSG (Watt)
20	226	32.47	0.45	14.61	4.70	1.96	9.21	15.30
25	199	30.45	0.61	18.57	5.74	2.19	12.57	19.45
30	186	27.92	0.77	21.50	6.43	2.31	14.85	22.51
35	169	24.61	0.94	23.13	6.73	2.36	15.88	24.22
40	154	21.71	1.07	23.23	6.76	2.37	16.02	24.32
45	135	18.50	1.15	21.28	6.37	2.30	14.65	22.28
50	116	15.41	1.20	18.49	5.77	2.16	12.46	19.36
55	97	12.20	1.22	14.88	5.01	2.04	10.22	15.59
60	84	10.27	1.24	12.73	4.47	1.86	8.31	13.33
65	70	7.95	1.23	9.78	3.69	1.74	6.42	10.24
70	62	6.58	1.20	7.90	3.14	1.60	5.03	8.27
75	56	5.67	1.19	6.75	2.84	1.55	4.41	7.07
80	50	4.82	1.17	5.64	2.38	1.45	3.44	5.91

Pada kecepatan 3 m/s hasil keluaran daya maksimum berada pada *duty cycle* 40% dengan hasil daya keluaran konverter sebesar 16.02 Watt.

Tabel 6
Hasil Daya Maksimum Pada Kecepatan 4 M/S

RPM = 299.8								
Beban = 2 lampu								
Duty Cycle (%)	Kecepatan (rpm)	V Rectifier (Volt)	I Rectifier (Ampere)	P Rectifier (Watt)	V Converter (Volt)	I Converter (Ampere)	P Converter (Watt)	P PMSG (Watt)
20	302	43.92	0.50	21.96	6.76	2.34	15.82	22.99
25	268	41.22	0.72	29.68	8.34	2.62	21.85	31.08
30	255	38.40	0.90	34.56	9.37	2.79	26.14	36.19
35	237	34.83	1.12	39.01	10.11	2.94	29.72	40.85
40	220	31.72	1.27	40.28	10.32	2.97	30.65	42.18
45	200	27.71	1.44	39.90	10.13	2.94	29.78	41.78
50	172	23.31	1.56	36.36	9.50	2.82	26.79	38.08
55	150	19.55	1.62	31.67	8.55	2.67	22.83	33.16
60	127	15.55	1.65	25.66	7.35	2.47	18.15	26.87
65	106	13.20	1.66	21.91	6.70	2.34	15.68	22.94
70	96	11.07	1.63	18.04	5.89	2.16	12.72	18.89
75	82	9.02	1.63	14.70	5.11	2.02	10.32	15.40
80	70	8.12	1.68	13.64	4.71	1.96	9.23	14.28

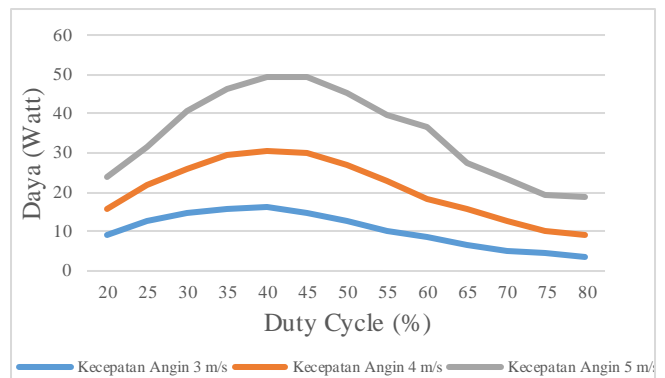
Pada kecepatan 4 m/s hasil keluaran daya maksimum berada pada *duty cycle* 40% dengan hasil daya keluaran konverter sebesar 30.65 Watt.

Tabel 7
Hasil Daya Maksimum Pada Kecepatan 5 M/S

RPM = 374.8								
Beban = 2 lampu								
Duty Cycle (%)	Kecepatan (rpm)	V Rectifier (Volt)	I Rectifier (Ampere)	P Rectifier (Watt)	V Converter (Volt)	I Converter (Ampere)	P Converter (Watt)	P PMSG (Watt)
20	354	56.02	0.54	30.25	8.78	2.69	23.62	31.68
25	343	53.18	0.75	39.89	10.58	2.99	31.63	41.76
30	328	49.31	1.03	50.79	12.40	3.29	40.80	53.18
35	309	45.58	1.28	58.34	13.46	3.44	46.30	61.09
40	291	41.90	1.47	61.59	14.06	3.51	49.35	64.50
45	271	37.43	1.66	62.13	14.10	3.52	49.63	65.06
50	228	30.91	1.86	57.49	13.22	3.41	45.08	60.20
55	200	26.35	1.94	51.12	12.24	3.26	39.90	53.53
60	172	22.11	2.00	44.22	11.91	3.06	36.44	46.30
65	142	18.20	2.02	36.76	9.60	2.88	27.65	38.50
70	128	15.13	2.05	31.02	8.64	2.70	23.33	32.48
75	110	12.45	2.05	25.52	7.55	2.52	19.03	26.73
80	98	11.51	2.12	24.40	7.42	2.50	18.55	25.55

Pada kecepatan 5 m/s hasil keluaran daya maksimum berada pada *duty cycle* 45% dengan hasil daya keluaran konverter sebesar 49.63 Watt.

Dengan menggunakan beban dua lampu pada kecepatan 3 m/s hingga 5 m/s memiliki nilai daya maksimum pada *duty cycle* yang berbeda dengan besaran daya keluaran yang berbeda. Semakin besar kecepatan angin, maka akan semakin besar pula daya yang dihasilkan oleh generator. Nilai *duty cycle* naik seiring dengan naiknya kecepatan. Gambar 6 menunjukkan grafik perbandingan daya keluaran generator pada setiap kecepatan seiring dengan perubahan *duty cycle*.

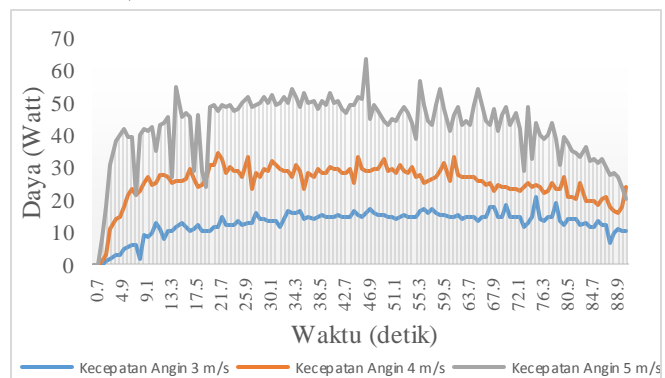


Gambar 6. Perbandingan daya keluaran konverter pada kecepatan 3 m/s hingga 5 m/s

C. Pengujian Nilai Daya Maksimum Dengan MPPT

Pengujian nilai daya maksimum menggunakan MPPT dilakukan dengan cara menggunakan 2 metode algoritma yang berbeda. Pengujian pertama dilakukan dengan menggunakan metode *perturb and observe*. Pengujian kedua dilakukan dengan menggunakan metode *modified perturb and observe*. Pengujian tersebut dilakukan pada enam kecepatan angin yang berbeda, 3 m/s hingga 5 m/s digunakan beban dua lampu. Hasil yang didapatkan pada kedua metode tersebut akan dibandingkan. Implementasi kedua metode pada sistem turbin angin dengan *time delay* 0.7 detik.

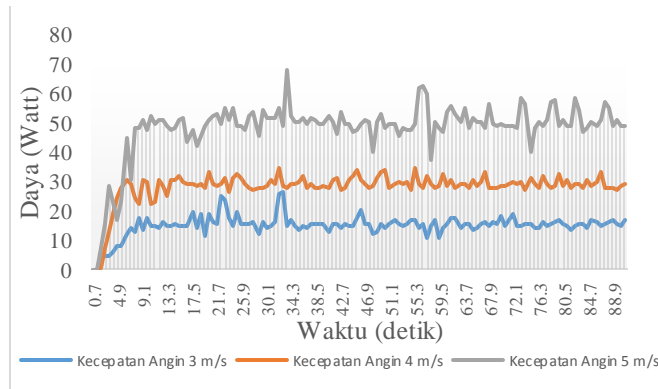
D. Pengujian Nilai Daya Maksimum Dengan MPPT (Perturb & Observe)



Gambar 7. Perbandingan daya keluaran konverter dengan MPPT (P&O) pada kecepatan 3 m/s hingga 5 m/s

Pada kecepatan angin 3 m/s turbin angin menghasilkan daya keluaran puncak rata-rata sebesar 12.68 Watt. Variasi dari *time delay* mempengaruhi waktu tempuh untuk mencapai titik maksimum. Waktu yang dibutuhkan *time delay* 0.7 adalah 32.9 detik. Pada kecepatan angin 4 m/s turbin angin menghasilkan daya keluaran puncak rata-rata sebesar 25.07 Watt saat *time delay* 0.7. Waktu yang dibutuhkan *time delay* 0.7 adalah 28.7 detik. Pada kecepatan angin 5 m/s turbin angin menghasilkan daya keluaran puncak rata-rata sebesar 42.32 Watt saat *time delay* 0.7 detik. Variasi dari *time delay* mempengaruhi waktu tempuh untuk mencapai titik maksimum. Waktu yang dibutuhkan *time delay* 0.7 adalah 25.2 detik.

E. Pengujian Nilai Daya Maksimum Dengan MPPT (Modified Perturb & Observe)



Gambar 8. Perbandingan daya keluaran konverter dengan MPPT (Modified P&O) pada kecepatan 3 m/s hingga 5 m/s

Pada kecepatan angin 3 m/s turbin angin menghasilkan daya keluaran puncak rata-rata sebesar 15.13 Watt saat *time delay* 0.7 detik. Waktu tempuh menuju titik daya maksimum pada saat *time delay* 0.7 adalah 14.7 detik. Pada kecepatan angin 4 m/s turbin angin menghasilkan daya keluaran puncak rata-rata sebesar 28.27 Watt saat *time delay* 0.7 detik. Waktu tempuh menuju titik daya maksimum pada saat *time delay* 0.7 adalah 13.3 detik. Pada kecepatan angin 5 m/s turbin angin menghasilkan daya keluaran puncak rata-rata sebesar 48.29 Watt saat *time delay* 0.7 detik. Waktu tempuh menuju titik daya maksimum pada saat *time delay* 0.7 adalah 9.1 detik.

F. Analisis Hasil Pengujian

Berdasarkan pengujian didapatkan hasil daya keluaran terhadap waktu dengan setiap kecepatan yang berbeda. Hasil tersebut juga memberikan perbedaan hasil diantara metode *perturb and observe* dan *modified perturb and observe*. Tabel 8 dan 9 menunjukkan perbandingan dari setiap hasil pengujian untuk memudahkan dalam menganalisa.

Tabel 8
Perbandingan Hasil Daya Pengujian

Kecepatan Angin	P&O	Modified P&O
3 m/s	12.68	15.13
4 m/s	25.07	28.27
5 m/s	42.32	48.29

*) dalam satuan Watt

Tabel 9
Perbandingan Hasil Waktu Pengujian

Kecepatan Angin	P&O	Modified P&O
3 m/s	32.9	14.7
4 m/s	28.7	13.3
5 m/s	25.2	9.1

*) dalam satuan detik

Pada tabel diatas, dapat terlihat bahwa metode *modified P&O* terbukti dapat menghasilkan daya keluaran yang lebih besar dibandingkan metode P&O. Selain itu juga, metode *modified P&O* memiliki kemampuan yang sangat cepat dalam mencari nilai titik daya maksimum. *Time delay* yang optimal

dalam menggunakan kedua metode tersebut harus disesuaikan dengan kondisi kecepatan turbin angin.

V. KESIMPULAN

Dari pengujian ini didapatkan beberapa kesimpulan:

1. Implementasi metode P&O memiliki kelemahan dalam menghasilkan daya keluaran. Daya keluaran dengan metode P&O akan turun seiring dengan naiknya *duty cycle*.
2. Implementasi metode *modified P&O* dapat mengatasi masalah turunnya nilai daya keluaran pada metode P&O. Sehingga nilai daya keluaran yang dihasilkan maksimum.
3. Metode *modified P&O* memiliki kemampuan *fast tracking* daya maksimum. Metode ini juga dapat mengurangi osilasi daya keluaran.
4. Penentuan *time delay* yang optimal harus disesuaikan dengan kondisi dari kecepatan angin.
5. Hasil daya keluaran dari metode P&O dengan *time delay* 0.7 pada kecepatan 3 m/s memiliki daya keluaran rata-rata 12.68 Watt, pada kecepatan 4 m/s memiliki daya keluaran rata-rata 25.07 Watt, pada kecepatan 5 m/s memiliki daya keluaran rata-rata 48.29 Watt.
6. Hasil daya keluaran dari metode *modified P&O* dengan *time delay* 0.7 pada kecepatan 3 m/s memiliki daya keluaran rata-rata 15.13 Watt, pada kecepatan 4 m/s memiliki daya keluaran rata-rata 28.27 Watt, pada kecepatan 5 m/s memiliki daya keluaran rata-rata 42.32 Watt.
7. Waktu yang dibutuhkan metode P&O menuju titik maksimum dengan *time delay* 0.7 pada kecepatan 3 m/s adalah 32.9 detik, pada kecepatan 4 m/s adalah 28.7 detik, pada kecepatan 5 m/s adalah 25.2 detik.
8. Waktu yang dibutuhkan metode *modified P&O* menuju titik maksimum dengan *time delay* 0.7 pada kecepatan 3 m/s adalah 14.7 detik, pada kecepatan 4 m/s adalah 13.3 detik, pada kecepatan 5 m/s adalah 9.1 detik.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Kementerian ESDM RI, "Blueprint Pengelolaan Energi Nasional 2006-2025", Arsip Kementerian ESDM RI, Jakarta, 2006.
- [2] Yacine Daili, Jean-Paul Gaubert, Lazhar Rahmani, "Implementation of a new maximum power point tracking control strategy for small wind energy conversion systems without mechanical sensors", Energy Conversion and Management, Vol. 97, 2015, pp. 298-306.
- [3] Zaiming Fan, "Mathematical Modelling of Grid Connected Fixed-Pitch Variable-Speed Permanent Magnet Synchronous Generators for Wind Turbines", University of Central Lancashire, 2012.